

[Display without Links](#) | [Return to Results](#)

## Display from CAPLUS (Patents focus)

ANSWER 1 © 2005 ACS on STN

[Find documents citing this reference \[€ 2.00\]](#)**Title**

Procedure and device for the determination of the form or the illustration characteristics of reflecting or transparent objects [Machine Translation].

**Patent Assignee**

Haeusler, Gerd, Prof., Germany

**Publication Source**

Ger. Offen.

**Identifier-CODEN**

GWXXBX

**Patent Information**

PATENT NO.	KIND	DATE	APPLICATION NO.	DATE
DE 19944354	A1	20010412	DE 1999-19944354	19990916 <--

**Priority Application Information**

DE 1999-19944354	19990916
------------------	----------

**Abstract**

[Machine Translation of Descriptors]. A procedure and a device are described, with which the form or the illustration characteristics can be determined by reflecting or transparent test specimens. The procedure is based on the fact that an essentially sinusoidal sample, which in a distance from the test specimen one produces is illustrated after reflection or in examination by the test specimen of an auxiliary optics and the local phase of this sample in the image plane is determined. A procedure for the choice of the distance of the sample from the test specimen, is indicated to the observation aperture of the auxiliary optics and the period of the sample so that the optimum sensitivity and accuracy of the method are reached.

**International Patent Classification****International Patent Classification, Main**

G01B011-24

**International Patent Classification, Secondary**

G01B011-25; G01B011-30; G01N021-45; G02B027-00

**Document Type**

Patent

**Language**

German

**Accession Number**

2001:257770 CAPLUS

**Cited Reference or Reference**

- (1) Anon; DE 19757106 A1
- (2) Anon; DE 19821059 A1
- (3) Anon; US 4742237
- (4) Anon; WO 9817971 A1
- (5) Marguerre, H; Feinwerktechnik & Messtechnik 1983, V91(2), P67

[Full-Text Options](#)[STN Keep & Share](#)[Search the Web](#)

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



DE 199 44 354 A 1

①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 44 354 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**G 01 B 11/24**  
G 01 B 11/25  
G 01 B 11/30  
G 01 N 21/45  
G 02 B 27/00

②① Aktenzeichen: 199 44 354.8  
②② Anmeldetag: 16. 9. 1999  
④③ Offenlegungstag: 12. 4. 2001

⑦① Anmelder:  
Häusler, Gerd, Prof. Dr., 91056 Erlangen, DE

⑦② Erfinder:  
Antrag auf Nichtnennung

⑤⑥ Entgegenhaltungen:  
DE 198 21 059 A1  
DE 197 57 106 A1  
US 47 42 237  
WO 98 17 971 A1

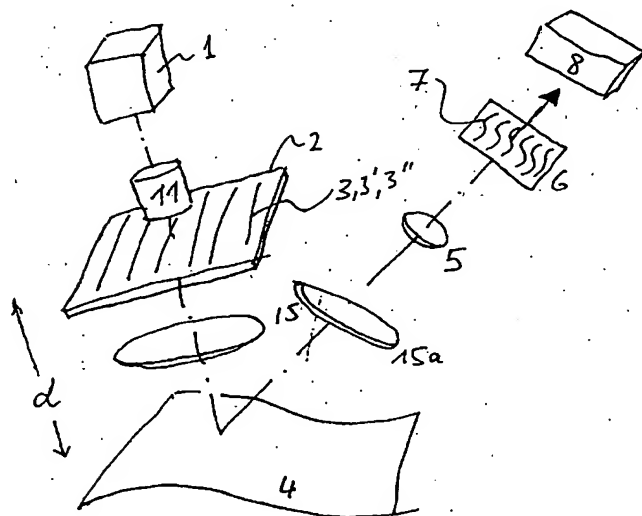
H. Marguerre: Dreidimensionale optische Form-  
erfassung von Oberflächen zur Qualitätsprüfung,  
in: Feinwerktechnik & Messtechnik 91 (1983) 2,  
S. 67-70;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Form oder der Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Objekten

⑤⑦ Es wird ein Verfahren und eine Vorrichtung beschrieben, mit der die Form oder die Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Prüflingen bestimmt werden kann. Das Verfahren beruht darauf, daß ein im wesentlichen sinus-förmiges Muster, das in einem Abstand vom Prüfling erzeugt wird, nach Spiegelung oder in Durchsicht durch den Prüfling von einer Hilfsoptik abgebildet und die lokale Phase dieses Musters in der Bildebene bestimmt wird. Es wird ein Verfahren für die Wahl des Abstands des Musters vom Prüfling, der Beobachtungsapertur der Hilfsoptik und der Periode des Musters angegeben, so daß die bestmögliche Empfindlichkeit und Genauigkeit der Methode erreicht wird.



DE 199 44 354 A 1

## Beschreibung

Das Patent beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur optischen Vermessung von vorwiegend blanken, auch stark gekrümmten Oberflächen, oder zur Vermessung der Form oder der Abbildungseigenschaften von optischen Elementen und Systemen, die auch solche Oberflächen enthalten. Damit sind reflektierende, und auch transparente brechende Flächen in Reflexion und im Durchlicht meßbar. Das Verfahren gibt auch eine Lehre, es so zu gestalten, daß es optimal arbeitet, d. h., man kann die informationstheoretisch und physikalisch bestmögliche Genauigkeit erreichen.

Während für die optische Vermessung von diffus reflektierenden Oberflächen eine große Anzahl von Meßverfahren zur Verfügung stehen, ist die optische Vermessung von blanken, z. B. polierten Oberflächen mit hoher Genauigkeit noch nicht gelöst, wenn diese Flächen größere Abweichungen von der Ebenheit oder von einer Sphäre haben. Für die Spezialfälle 'ebene Fläche' oder 'Sphäre' gibt es verschiedene interferometrische Verfahren, die zwar Standard sind, aber komplex und störanfällig. Für schwach asphärische Flächen gibt es Verfahren, die die Asphärizität durch geeignete Elemente wie Referenzoptiken oder Hologramme kompensieren. Abgesehen davon, daß die Erstellung von Kompensationsoptiken äußerst kompliziert und kostenintensiv ist, gibt es zusätzliche Probleme bei stark gekrümmten, stark asphärischen Oberflächen, und/oder bei großen optischen Elementen, und bei Messungen in Reflexion. Solche Elemente sind z. B. sphärische und asphärische Linsen, auch asphärische Brillengläser, auch sphärische und asphärische Spiegel, ebenso aber auch z. B. Kunststoff-Folien, Siliciumwafer, Solarzellen, oder auch lackierte Bleche, z. B. Autokarosserien.

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren, die eine optische Vermessung solcher Objekte ermöglichen sollen. Dazu gehören Varianten des Hartmann-Verfahrens (beschrieben bei J. Hartmann, "Objektivuntersuchungen", Z. Instrumentenkunde 24(1904)1, oder bei G. Häusler, G. Schneider, "Testing optics by experimental ray tracing with lateral effect photodiode", Appl. Opt. 27(1988) 5160), oder z. B. der Shack-Hartmann-Test. Hier wird prinzipiell ein schmales Strahlenbündel durch die Pupille des Systems geschickt, und der Verlauf des Bündels nach der Ablenkung durch den Prüfling durch einen oder mehrere ortsauflösende Empfänger gemessen. Wenn man den Verlauf des Bündels genau kennt, kann man die optische Wirkung des Prüflings strahlenoptisch charakterisieren. Die Charakterisierung erfordert z. B. die Ermittlung zweier Durchstoßpunkte des Strahls, z. B. durch die Pupille und durch den Empfänger. Eine genaue Messung ist nur mit hochgenauen ortsauflösenden Detektoren möglich.

Ein zusätzlicher Nachteil des Verfahrens ist, daß die Pupille durch das Strahlenbündel sequentiell abgetastet (abgerastert) werden muß, was zeitaufwendig ist. Dies wird im sog. Ronchi-Test gemildert: Hier wird ein "Ronchi-Gitter", d. h. ein Gitter aus transparenten Linien benutzt, um viele Strahlen parallel auszuwählen.

Aber eine lückenlose parallele Vermessung des gesamten Prüflings ist damit auch nicht möglich.

Ein weiteres Problem ist folgendes: die Empfänger müssen bei stark gekrümmten Flächen entweder groß sein oder mit dem die Pupille abtastenden Strahlenbündel mitgeführt werden.

Es treten also zunächst grundsätzlich zwei Probleme auf: erstens muß die Pupille abgetastet werden, um eine vollflächige Information über die Wirkung des Systems zu bekommen, und zweitens können die Strahlen sehr schräg unter großen Winkeln durch den Raum laufen und sind deshalb

praktisch nicht mit hoher Genauigkeit zu charakterisieren, ohne sehr große Empfänger oder aufwendige Führungsmechanismen für die Empfänger.

Die o. g. Probleme werden z. B. im US Patent 4,742,237 (K. Ozawa, 3.5.1988) – für ein spiegelndes Objekt – zum Teil gelöst, indem ein Gitter auf einen streuenden Schirm ("Streuscheibe") projiziert wird, der in einiger Distanz vom Prüfling angeordnet ist. Das Gitter wird nun über eine Reflexion am Prüfling durch eine Hilfsoptik beobachtet. Wenn der Prüfling kein ebener Spiegel ist, sondern eine Krümmung aufweist, erscheinen die beobachteten Gitterlinien deformiert. Aus dieser Deformation kann man näherungsweise die Oberflächenneigung bestimmen.

Aber auch hier gibt es entscheidende Nachteile: erstens, man kann nur an den Orten messen, wo eine Gitterlinie vorhanden ist, dazwischen hat man keine Information. Deshalb wird im o. g. US Patent 4,742,237 vorgeschlagen, das Gitter zu bewegen, um die Pupille so abzutasten.

Der zweite Nachteil ist ein allen Verfahren gemeinsamer Nachteil, der im folgenden genauer diskutiert wird, und der in seinen Auswirkungen erfindungsgemäß so weit es die Physik erlaubt, reduziert wird:

Sehr oft möchte man kleinste Abweichungen der Form mit hoher lateraler Auflösung detektieren. Zum Beispiel möchte man bei asphärischen Brillengläsern (Gleitsichtgläser) die Brechkraft auf 1/100 Dptr messen, und dies über eine Fläche von nur 2–3 mm Durchmesser. Oder man möchte lokale Neigungsvariationen auf einem Siliciumwafer von nur 1 Bogensekunde über wenige mm Gesichtsfeld sehen. Auch die Messung feinsten Dellen in Karosserieblechen ist eine herausfordernde Aufgabe.

Das oben beschriebene Verfahren (US 4,742,237), aber auch andere können diese Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Ortsauflösung prinzipiell nicht erreichen, weil zwei grundsätzliche Schwierigkeiten nicht gelöst sind.

Erstens: man muß gleichzeitig die Pupille des Prüflings und das Gitter möglichst scharf abbilden. Eine solche Abbildung ist wegen der Beugung des Lichtes in jedem Fall nur als Kompromiß möglich, man muß die Schärfentiefe der Hilfsoptik durch Abblenden so steigern, daß sowohl das Gitter auf der Streuscheibe als auch die Pupille des Prüflings scharf abgebildet werden. Dies ist bei einem Gitter vom Ronchi-Typ aber praktisch nicht möglich, weil es sehr hohe Ortsfrequenzen (Scharfe Kanten) enthält.

Zweitens: Man muß die Deformation des beobachteten Gitterbildes sehr genau bestimmen. Da aber der Prüfling für die Beobachtung des Gitters Aberrationen einführt, wird die Intensitätsverteilung im Bild des Ronchi-Gitters verändert, was eine genaue Lokalisation unmöglich macht.

Alle diese Nachteile vermeidet man, indem man erfindungsgemäß ein Sinusgitter auf die Streuscheibe projiziert, und das Bild des Sinusgitters nach Reflexion am Prüfling, oder nach Transmission durch den Prüfling, beobachtet. Das Sinusgitter hat dabei mehrere Vorteile: Es hat keine Oberflächenwellen, d. h., man muß keine hohen Ortsfrequenzen im Gitterbild auflösen, d. h., man kommt mit geringerer Schärfentiefe aus. Die Wahl der Gitterfrequenz hängt von den Anforderungen an die laterale Auflösung und an die Winkelauflösung ab. Das Verfahren zur optimalen Wahl der Gitterperiode wird unten beschrieben. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist, daß die Deformation des beobachteten Gitterbildes sehr einfach mit sehr hoher Genauigkeit meßbar ist. Dazu stehen sogenannte Phasenshift-Verfahren (z. B. M. Halioua, H. Liu, V. Srinivasan, "Automated phase measuring profilometry of diffuse objects", Appl. Opt. 23 (1984) 3105) zur Verfügung. Sie funktionieren prinzipiell so, daß mindestens drei phasenverschobene Gitter projiziert und beobachtet werden. Daraus kann die lokale Phase und damit die Deformation

des beobachteten Gitterbildes bestimmt werden. Weiter ist die Deformation des beobachteten Gitterbildes lückenlos auf der gesamten Pupille des Prüflings bestimmbar. Weil hier die Ablenkung von Strahlenbündeln oder Wellen am Prüfling durch Phasenmessung an Gitterbildern bestimmt wird, wird das im Patent beschriebene Verfahren "phasenmessende Deflektometrie" (Abk.: PMD) genannt.

Damit ergibt sich nach der schematischen Fig. 1 folgende Vorrichtung, hier für ein reflektierendes Element beschrieben. Für ein transmittierendes Element, z. B. eine Linse, funktioniert das Verfahren sinngemäß, wie auch andere Ausgestaltungen mit verschiedener Geometrie oder anderen Abbildungselementen möglich sind.

a) Mit Hilfe eines Projektors 1 wird auf eine Streuscheibe 2 ein Primärbild 3 des Sinusgitters projiziert, wie schematisch in Fig. 1, an Pos. 3 dargestellt. Genauer, es wird eine Sequenz von jeweils verschobenen Sinusgittern (Gitter mit sinusförmig verlaufender Intensität) projiziert, oder eine geeignete Kombination von Schwarz-Weiß-Gittern, z. B. als Graycode-Muster. Auch farbige oder polarisierende Gitter sind denkbar, wobei jede Farbe oder Polarisationsrichtung eine Phase der Sequenz codiert. Die so auf der Mattscheibe entstehenden Muster werden im folgenden einfach 'Gitter' genannt.

b) Die Streuscheibe 2 steht im Abstand  $d$  vor dem Prüfling 4, hier beispielsweise als gekrümmter Spiegel im Schnitt gezeichnet. Prinzipiell gelten alle Überlegungen sinngemäß auch für transparente Prüflinge.

c) Die Streuscheibe 2 mit den Gittern wird durch eine Hilfsoptik 5 nach Reflexion durch den Prüfling so auf den Empfänger 6 abgebildet, daß die Bilder 7 der Gitter (im folgenden "beobachtete Gitterbilder" genannt) auf dem Empfänger 6 erscheinen. Die Dabei wird die Schärfentiefe vorzugsweise so gewählt, daß sowohl die Gitter 3 wie auch der Prüfling 4 näherungsweise in die Ebene des Empfängers 6 (die Bildebene) scharf abgebildet werden. Dieser kritische Prozess, der für die Genauigkeit des Verfahrens wesentlich ist, wird unten näher betrachtet. Die beobachteten Gitterbilder werden dann gespeichert und in einer Auswerteeinheit 8 ausgewertet.

Kern der Überlegungen ist zunächst, daß der Empfänger 6 (mit der Hilfsoptik 5), der die Deformation des beobachteten Gitterbildes und damit die Ablenkung der Strahlen durch den Prüfling nach dem Durchgang durch das System bestimmt, den gesamten Prüfling gleichzeitig erfassen muß. Damit das beobachtete Gitterbild die gesamte Pupille des Prüflings, bzw. den Prüfling abdeckt, müssen dem Prüfling am Eingang Strahlen aus sehr vielen Richtungen angeboten werden. Dies geschieht dadurch, daß vor der Pupille des Prüflings, in geeignetem Abstand, ein streuendes Element angebracht wird, das das einfallende Licht vorwiegend diffus in alle Richtungen zum Prüfling hin streut. Das streuende Element 2, kurz 'Streuscheibe' genannt, muß so groß sein, daß vom Empfänger aus gesehen, der Prüfling ganz ausgeleuchtet erscheint. Mit anderen Worten, von jedem Ort des Prüflings (oder dessen Pupille) müssen Strahlen nach der Reflexion (oder bei transmittierenden Objekten, nach der Brechung) auf die Eintrittspupille der Hilfsoptik treffen. Dies kann bei stark gekrümmten Flächen sehr große Streuscheiben nötig machen.

e) Es werden nun nacheinander phasenverschobene primäre Gitterbilder projiziert, die in Fig. 1 durch die Bezugszeichen 3, 3', 3'', symbolisiert sind. Eine häufig

gewählte Sequenz benutzt 4 primäre Gitterbilder mit einer jeweiligen Phasenverschiebung von 0 Grad, 90 Grad, 180 Grad, 270 Grad. Die beobachteten Gitterbilder werden vorzugsweise elektronisch gespeichert und mit Hilfe bekannter Verfahren (Bruning'sches Phasenshift-Verfahren) ausgewertet. Andere Sequenzen mit anderen Phasenverschiebungen sind ebenso möglich. Mit diesen Verfahren ist es möglich, in jedem Bildpunkt auf dem Empfänger die Verschiebung bzw. Deformation des beobachteten Gitterbildes mit hoher Präzision zu bestimmen.

Es sind auch andere Gitterprojektionsverfahren bekannt, z. B. aus der Veröffentlichung von K. Andresen und B. Morche, ("Digitale Verarbeitung von Kreuzrasterstrukturen zur Verformungsmessung", VDI Ber., Verlag Dtsch. Ing., (1983), 19). Diese erreichen jedoch keine hohe Präzision, weil keine Sinusgitter verwendet werden. Die hohe Präzision des Phasenshiftverfahrens wird im wesentlichen durch die Projektion von Sinusgittern erreicht. Ein besonderer Vorteil des Verfahrens ist auch, daß jeder Punkt (x, y) des Prüflings unabhängig von seinen Nachbarn vermessen werden kann.

f) Aus der Deformation des beobachteten Gitterbildes kann man über einfache geometrische Beziehungen die lokale Neigung des Prüflings ermitteln. Zur Veranschaulichung diene Fig. 2: Hier ist als Prüfling 4 zur vereinfachten Erklärung eine keilförmige Glasplatte benutzt worden. Ein Oberflächenpunkt 9 auf dem Prüfling wird auf dem Empfänger 6 in den Bildpunkt 9a abgebildet. Ohne Prüfling würde man am Ort 9a auf dem Empfänger eine Intensität sehen, wie sie durch die sinusförmige Intensitätsverteilung 10 des Gitters am Ort 9b gegeben ist. Da der Prüfling eine Ablenkung der Strahlen um den Winkel  $w$  bewirkt, sieht der Empfänger 6 aber nun die Intensität des Gitters am Ort 9c. Das Gitter erscheint um die Strecke  $e$  verschoben. Die Strecke  $e$  errechnet sich zu  $e = d \cdot \tan w$ , bzw. in Näherung zu  $e = d \cdot w$ . Wenn man  $e$  für jeden Prüflingspunkt (x, y) kennt, kann man die lokale Neigungsänderung  $w(x, y)$  bestimmen. Weil oft die Geometrie der Anordnung nicht genau erfassbar ist, arbeitet man mitunter auch mit dem Vergleich mit einem Referenzobjekt. Dieses kann z. B. eine ebene Glasplatte oder ein ebener Spiegel sein, dann läßt sich aus der Differenz  $e$  zwischen beobachtetem Referenz-Gitterbild und beobachtetem Prüflings-Gitterbild die lokale Neigung des Prüflings bestimmen. Wenn die Verschiebung  $e$  zu groß wird (bei stark gekrümmtem Prüfling), so kann man vorzugsweise ein angepaßtes Referenzobjekt verwenden. Dies kann z. B. ein perfekter, oder genau vermessener Prüfling sein, oder ein ähnlich aussehendes Objekt, z. B. eine sphärische Fläche, die einer zu messenden Asphäre nahekommt, die aber die Grundkrümmung kompensiert. Für nicht zu große Objekte gibt es auch die Möglichkeit, die Geometrie der Vorrichtung einfach zu gestalten, indem telezentrische Beleuchtung und/oder telezentrische Beobachtung realisiert werden. Dann entfallen die perspektivischen Verzerrungen, und die Abbildungsmaßstäbe sind unabhängig von den Entfernungen.

g) Da das Verfahren nur die Komponente der Oberflächenneigung (des Gradienten) senkrecht zu den Gitterlinien mißt, muß der Vorgang a)–f) mit einem zweiten Gitter wiederholt werden, das senkrecht zum ersten Gitter orientiert ist. Dazu kann z. B. der Projektor 1 um 90 Grad gedreht werden, oder es kann auch eine opti-

sche Anordnung zur Drehung des Gitterbildes, z. B. ein Dove-Prisma 11 zur Bilddrehung verwendet werden. Wenn der Prüfling bestimmte Symmetrie aufweist, z. B. Rotationssymmetrie oder zylindrische Symmetrie, so kann es zweckmäßig sein, die Gitter dieser Symmetrie anzupassen, z. B. ringförmig anzuordnen, oder gar so vorzuverformen, daß das beobachtete Gitterbild eine einfache Form aufweist.

h) Wenn man die lokale Neigung  $w(x, y)$  des Prüflings oder der vom Prüfling reflektierten oder transmittierten Strahlen bestimmt hat, so läßt sich durch räumliche Integration die Form der Fläche  $z(x, y)$  bestimmen. Ebenso läßt sich durch räumliche Differentiation die Krümmung der Fläche bestimmen. Handelt es sich um optische Elemente, so besteht die Aufgabe oft darin, die lokale Brechkraft zu bestimmen. Diese kann auch durch räumliche Differentiation der lokalen Neigung  $w(x, y)$  ermittelt werden. In vielen Fällen ist man nicht an der Form der Oberfläche interessiert, sondern nur an der Detektion von Fehlern. Zum Beispiel bei der Prüfung von Solarzellen kann man mit der Methode sehr einfach Brüche detektieren. Sie äußern sich in einer Unstetigkeit der lokalen Neigung, und damit in einem sichtbaren Sprung der lokalen Phase im beobachteten Streifenmuster.

Für transparente Prüflinge, wie z. B. Brillengläser, Autoscheiben, Folien oder ähnliche Elemente, ist die Auswertung äquivalent. Man mißt hier allerdings nicht die Oberflächenneigung sondern die Neigung der abgelenkten Strahlen. Die Oberfläche ergibt sich über die Geometrie der Abbildung und das Brechungsgesetz und ist prinzipiell so zu ermitteln. In vielen Fällen ist man aber eher an der optischen Wirkung, d. h. an der lokalen Brechkraft interessiert, wie z. B. bei asphärischen Brillengläsern.

Damit ist die prinzipielle Funktion des Verfahrens erklärt. Für eine hochgenaue Messung sind jedoch erfindungsgemäß weitere Überlegungen notwendig. Diese betreffen die Erzeugung präziser Sinusmuster, die effektive Ausleuchtung des Prüflings, die Verringerung von kohärentem Rauschen, die Unterdrückung parasitärer Reflexe und die informationstheoretisch optimale Wahl von Beobachtungsapertur, Abstand  $d$  und Gitterperiode  $p$ , sowie dem Fokusort der Hilfs-optik.

i) Eine wichtige Rolle spielen die primären Sinusgitter-Bilder, die auf der Streuscheibe erzeugt werden. Es ist wichtig, daß diese Gitter mit hoher Genauigkeit eine sinusförmige Intensitätsverteilung aufweisen. Eine solche kann z. B. mit dem in der Veröffentlichung von G. Häusler und M. Gruber genannten Verfahren ("Simple, robust and accurate phase measuring triangulation", Optik 89 (1992) 118) erzeugt werden, oder, auf optoelektronischem Weg, durch das in der Patentschrift "Vorrichtung zur Erzeugung streifenartiger Lichtmuster", Deutsches Patent P 43 43 830 angemeldet am 15.12.93, von G. Häusler und R. Lampalzer, beschriebene Verfahren. Wie in Fig. 3 beschrieben beruhen diese Methoden im wesentlichen darauf, daß durch eine astigmatische Optik 13 auch aus binären (schwarz-weiß-) Mustern 12 präzise Grautonmuster 14 erzeugt werden können, z. B. auch Sinusmuster 10. Mit Hilfe von Flüssigkristall-Displays kann man das Umschalten der Phase sehr schnell, z. B. im Videotakt, realisieren. Es sind auch andere Technologien zur elektronischen Erzeugung und Umschaltung von Gittern denkbar, z. B. mit Hilfe von DMD-Spiegelarrays (hergestellt von der Fa. Texas Instruments) oder von

Plasma-Displays. Damit ist eine schnelle Messung in z. B. 4 Videotakten möglich. Es sind aber auch andere Verfahren zur Sinusgitter-Erzeugung möglich, z. B. die sogenannte "geditherten" Gitter, bei denen die gewünschte Intensitätsverteilung näherungsweise durch ein feines Raster wie beim Zeitungsdruck erzeugt wird. Durch Projektion mit geringer lateraler Auflösung wird das Raster unterdrückt, und nur die relativ grobe Sinus-Verteilung ist sichtbar. Allerdings müssen die entsprechenden Gitter mechanisch bewegt werden, solange sie nicht auf elektronischem Wege umschaltbar erzeugt werden.

j) Die Streuscheiben müssen für große oder stark gekrümmte Prüflinge groß sein. Wie in Fig. 4a dargestellt, wird das Licht von der Mattscheibe wegen der Beleuchtungsgeometrie vorwiegend divergent vorwärts gestreut. Damit eine Streuung vorzugsweise in Richtung auf den Prüfling und auf die Pupille der Hilfs-optik erfolgt, wird zweckmäßig vor der Streuscheibe eine Sammellinse wie in Fig. 4b skizziert, angeordnet. Alternativ kann auch eine Integration von Mattscheibe und Sammellinse, z. B. in Form einer Fresnel-Linse, verwendet werden.

k) Die Deformation des Gitterbildes wird durch ein Phasenshiftverfahren bestimmt. Dieses funktioniert umso genauer, je weniger rauschbehaftet die Bilder sind. Eine wichtige Rauschquelle ist das Specklerauschen, das insbesondere bei der teilkohärenten Abbildung über eine Mattscheibe auftritt. Dieses Rauschen kann z. B. durch Bewegung der Mattscheibe während der Integrationszeit der Fernsehkamera reduziert werden. Diese Bewegung kann z. B. durch Rotation der Mattscheibe um eine Achse 16 vorzugsweise außerhalb des beobachteten Bildfeldes erfolgen. Es ist auch eine Vibration der Streuscheibe denkbar. Aber auch eine Streuscheibe mit einer fluoreszierenden Beschichtung ist geeignet, das Specklerauschen zu reduzieren, wenn die Beleuchtung mit Fluoreszenzanregendem Licht erfolgt, und die Beobachtung im Fluoreszenzlicht; im allgemeinen bei einer größeren Wellenlänge. In jedem Fall ist das System besonders rauscharm, wenn man die Apertur der Musterprojektion größer als die Beobachtungsapertur der Hilfs-optik macht.

l) Die Phasenmessung ist empfindlich gegen parasitäre Reflexe. Wenn z. B. der Prüfling transparent ist, so stört z. B. bei der Messung einer Vorderfläche in Reflexion die Reflexion an der Rückfläche. Diese Reflexion kann stark unterdrückt werden, indem an die Rückfläche (bzw. die störende Fläche) ein absorbierendes Material mit vorzugsweise gleicher Brechzahl angeklebt wird. Ist die störende Fläche eben, so kann einfach ein Schwarzglas mit Immersion oder Optikkitt in Kontakt gebracht werden. Ist die Fläche gekrümmt, so muß entweder eine angepaßte Fläche gefertigt werden oder der Zwischenraum durch geeignete Immersion (bzw. Kitt) die auch absorbierend sein darf, aufgefüllt werden. Prinzipiell kann auch auf das Schwarzglas verzichtet werden, wenn die Immersion, bzw. der Kitt soviel Absorption aufweisen, daß die neue Rückfläche nur noch sehr wenig Licht in die Meßanordnung reflektiert.

Im folgenden wird nun ein weiterer Kernpunkt der Erfindung beschrieben: das Verfahren zur geeigneten Wahl von Gitterperiode  $p$ , dem Abstand  $d$  der Streuscheibe vom Prüfling, der Apertur  $a$  der Hilfs-optik und dem Fokusort dieser Optik. Die Verhältnisse sind in Fig. 2 skizziert. Die grundsätzliche Problematik aller deflektometrischen Methoden (so genannt, weil die Ablenkung von Strahlen am Prüf-

ling gemessen wird) ist eine tiefgehende physikalische Beschränkung: man muß den Ort eines "Strahls" auf dem Prüfling, und seine Richtung gleichzeitig kennen, was wegen der Beugung nur mit einer Unsicherheit möglich ist. Je genauer man den Ort des Strahls auf dem Prüfling kennt (= "Strahl sehr dünn"), desto mehr läuft der Strahl durch Beugung auseinander (= Richtung nicht definiert). Bei den Verfahren wo man tatsächlich mit Strahlen (genauer Strahlenbündeln) arbeitet (wie beim Hartmann-Test) darf man deshalb die Strahlen nicht zu dünn machen. Wenn man umgekehrt den Strahl zu breit wählt, dann kann man lokale Änderungen der Prüflingeigenschaften nicht mehr auflösen. Im vorliegenden Patent wird der Prüfling nicht mehr mit "Strahlen" abgetastet, man nimmt dagegen ein Gesamt-Bild auf, das Information über die lokale Neigung des Prüflings enthält. Auch hier wirkt die Beugung, und zwar so, daß man nicht gleichzeitig die beobachteten Gitterbilder und den Prüfling scharf sehen kann.

Von großer Bedeutung bei der Abbildung ist aber, daß der ermittelte Wert der lokalen Neigung  $w(x, y)$  sich auch einem bestimmten Ort  $x, y$  (in Fig. 2 durch das Bezugszeichen 9 repräsentiert) auf dem Prüfling zuordnen läßt. Dies nur eingeschränkt möglich. Hier soll ein Verfahren beschrieben werden, das die physikalisch bestmögliche Lösung einer gegebenen Meßaufgabe darstellt. In Fig. 2 ist eine Anordnung mit transparentem Prüfling gewählt, dies wegen der einfacheren Veranschaulichung, aber auch um darzustellen, daß das Verfahren sowohl in Reflexion als auch in Durchlicht funktioniert. Dabei ist das Objekt hier im Beispiel als prismatisch dargestellt, weil sich damit die Ablenkung besonders einfach erklären läßt.

Dabei ist es zunächst wichtig, die Meßaufgabe zu definieren: eine mögliche und häufige Aufgabe ist, die lokale Neigung der vom Prüfling durchgelassenen oder reflektierten Welle zu messen. Daraus wird es dann z. B. möglich, Fehler des Prüflings zu finden. Durch räumliche Differentiation ist es möglich, die lokale Brechkraft oder die lokale Krümmung des Prüflings zu bestimmen. Durch räumliche Integration läßt sich die Form des Prüflings ermitteln. Für hochwertige optische Elemente, oder um geringste Abweichungen von Objekten von den Soll-eigenschaften zu ermitteln, benötigt man eine sehr kleine auflösbare Winkeldistanz  $\delta w$ , die durch die Meßaufgabe mittelbar oder unmittelbar vorgegeben wird. Diese Vorgabe ist oft gemeinsam mit der lateralen auflösbaren Distanz  $\delta x$  auf dem Prüfling gegeben. Wie müssen Abstand  $d$ , Periode  $p$ , Beobachtungsapertur  $\sin u$  und Fokusort gewählt werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen?

Dies soll zunächst anhand eines Beispiels dargestellt werden. Will man zum Beispiel die Brechkraft eines Prüflings auf 1/100 Dptr genau messen, und dies innerhalb eines Feldes  $X$  auf dem Prüfling von  $X = 3$  mm, dies ist eine Aufgabe, wie sie bei der Vermessung asphärischer Brillengläser vorkommt, so ist plausibel, daß die auflösbare Distanz  $\delta x$  auf dem Prüfling nicht größer als 3 mm, besser noch etwas geringer sein sollte. Es ergibt sich daraus auch die ungefähr zu fordernde auflösbare Winkeldistanz  $\delta w = 4-6$  Bogensekunden.

Aus der geforderten auflösbaren Distanz  $\delta x$  ergibt sich mit der Abbe-schen Auflösungsformel die minimal erlaubte Apertur  $\sin u_{\min}$  der Hilfsoptik 5 (wegen der i. a. kleinen Aperturen genügt es meist, den Sinus durch den Winkel zu ersetzen). Es folgt also Schritt 1 des Verfahrens, die Definition der minimal möglichen Beobachtungsapertur.

$\sin u_{\min} \leq \lambda / \delta x$ , ( $\lambda$  = benutzte Wellenlänge,  $\sin u$  = objektseitige Apertur der Hilfsoptik 5). (1)

Aus (1) folgt wegen der nun festgelegten Schärfentiefe der Abbildung sofort als zweiter Schritt des Verfahrens die Festlegung des optimalen Abstandes  $d_{\min}$  zwischen Prüfling und Streuscheibe. Es versteht sich, daß  $d$  für eine empfindliche Messung so groß wie möglich zu wählen ist, damit eine große Verschiebung  $e$  erzeugt wird.

$$d \geq d_{\min} = \lambda / \sin^2 \alpha = \delta x^2 / \lambda \quad (2)$$

wobei  $d_{\min}$  gleich der Schärfentiefe der Hilfsoptik 5 entspricht.

Im Schritt 3 des Verfahrens ist die optimale Gitterperiode  $p$  zu wählen. Die Verschiebung  $e$  ergibt sich aus

$$e = d \cdot \tan \delta w \quad (3)$$

(für reflektierende Prüflinge ist  $e$  doppelt so groß). Die Verschiebung  $e$  soll so groß sein, daß sie eine detektierbare Phasendifferenz  $\delta \phi$  des beobachteten Gitterbildes erzeugt. Aufgrund technischer Beschränkungen (Kameraräuschen, Speckleräuschen, mechanischer, thermischer Instabilität) läßt sich die Phase mit den oben beschriebenen Methoden nur mit einer Unsicherheit  $\delta \phi = 2\pi/Q$  bestimmen.  $Q$  ist ein Qualitätsfaktor, der in der Praxis etwa bei 100 liegt, die Phase ist also etwa auf 1% von 360 Grad genau bestimmbar. Bessere Meßanordnungen können ein größeres  $Q$  haben. Für eine vorgegebene Winkelauflösung  $1/\delta w$  darf  $p$  also nicht größer sein als  $p_{\max}$

$$p \leq p_{\max} = e \cdot Q = d \cdot \tan \delta w \cdot Q \quad (4)$$

Damit ist bei einer vorgegebenen Winkelauflösung die maximale Gitterperiode gegeben. Andererseits darf  $p$  nicht so klein sein, daß der Kontrast durch die geringe laterale Auflösung zu stark reduziert wird. Für ausreichenden Kontrast sollte näherungsweise gelten:

$$p \geq p_{\min} = \delta x \cdot d / d_{\min}, \text{ für } d \geq d_{\min} \quad (5)$$

Der Faktor  $d/d_{\min}$  ist angefügt, weil bei unscharfer Abbildung mit  $d > d_{\min}$  die laterale Auflösung geringer wird und deshalb die Gitterperiode um etwa diesen Faktor größer gewählt werden muß.

Gleichungen (4, 5, 6) definieren den Bereich der optimalen Gitterperiode zwischen bestmöglicher Winkelauflösung ( $p = p_{\min}$ ) und der Periode, die einer geforderten Winkelauflösung angepaßt ist ( $p = p_{\max}$ ).

$$p_{\min} = \delta x \cdot d / d_{\min} \leq p \leq d \cdot \tan \delta w \cdot Q \quad (6)$$

Die bestmögliche Winkelauflösung erreicht man näherungsweise mit der Wahl  $p = p_{\min}$  und  $d = d_{\min}$ . Die auflösbare Winkeldistanz ist dann  $\tan \delta w = \delta x / (Q \cdot d_{\min})$ . Mit Gl. (2) ergibt sich daraus eine Unschärferelation

$$\tan \delta w \cdot \delta x \geq \lambda / Q, \quad (7) \text{ bzw. für kleine Winkel } \delta w: \delta w \cdot \delta x \geq \lambda / Q \quad (6a)$$

Die Gleichungen (7, 7a) geben (für das Gleichheitszeichen) die optimalen Werte des Produktes für die auflösbare Winkeldistanz und die auflösbare laterale Distanz auf dem Prüfling an. Solche optimalen Werte werden erfindungsgemäß durch die Verfahrensschritte 1-3 erreicht. Geringfügige Abweichungen davon können auftreten, je nach zulässigem Streifenkontrast. Die Messung wird etwas einfacher wenn etwa der vierfache Wert des Unschärfeproduktes eingestellt wird.

Das Verfahren zur Optimierung der phasenmessenden



Deflektometrie ist also wie folgt: Nach Festlegung der lateralen Auflösung  $1/\delta x$  auf dem Objekt, und Bestimmung der möglichen Meßqualität  $Q$ , kann man eine Winkelauflösung  $1/\delta \omega$  erreichen, wenn man

1. die Beobachtungsapertur  $\sin u$  nach Gleichung (1) wählt,
2. den Abstand  $d$  nach Ungleichung 2 wählt,
3. die Gitterperiode nach Ungleichung (6) wählt
4. Um die bestmögliche laterale Auflösung zu erreichen, ist vorzugsweise die Hilfsoptik 5 auf das Objekt scharfzustellen. Dies gilt insbesondere, wenn man  $d > d_{\min}$  wählt.

Bei zu geringer Schärfentiefe der Abbildung kann das beobachtete Gitterbild unscharf werden. Dies ist in geringem Maße zulässig, weil wegen der sinusförmigen Intensitätsverteilung sich die Unschärfe nur in einer Kontrastverringerng bemerkbar macht. Wählt man die Gitterperiode größer, was aus technischen Gründen notwendig sein kann, wird die erreichbare Winkelauflösung geringer, es sei denn, man erzeugt das Gitter in einem größeren Abstand  $d$ . Dann ist die Schärfentiefe nicht mehr ausreichend, aber wegen der größeren Periode  $p$  (Gl. (5)) erhält man noch ein beobachtetes Gitterbild, allerdings kann eine Verringerung des Kontrastes auftreten.

Diese Methode ist näherungsweise ohne Verringerung der lateralen Auflösung auf dem Prüfling möglich, wenn die Hilfsoptik auf den Prüfling scharfgestellt wird. Deshalb ist die Fokussierung auf den Prüfling vorteilhafter als die Fokussierung auf das Gitter.

Wenn der Prüfling selbst eine Grundkrümmung hat, und damit auch eine abbildende Wirkung, so sieht der Empfänger nicht das Gitter, sondern das durch den Prüfling entworfene Zwischenbild des Gitters, das in Größe und Lage verschieden sein kann. In diesem Fall gelten die obigen Überlegungen für dieses Zwischenbild. Eine solche Grundkrümmung kann aber auch durch eine Kompensationsoptik 15, 15a vor oder hinter dem Prüfling ausgeglichen werden, so daß das Zwischenbild nahezu identisch mit dem Gitter ist.

Bei stark gekrümmten Prüflingen kann die Eindeutigkeit der Phasenmessung verloren gehen, da die Phase nur modulo  $2\pi$  bekannt ist. In diesem Fall ist es zweckmäßig, mit mehreren verschiedenen Gitterfrequenzen zu arbeiten, wie es bei anderen phasenmessenden Methoden Stand der Technik ist.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Vermessung von spiegelnden oder transparenten Prüflingen, dadurch gekennzeichnet daß, ein Muster mit vorzugsweiser sinusförmiger Intensitätsverteilung zunächst in einer Entfernung  $d$  vom Prüfling so auf einen Streuer abgebildet wird, daß nach der Abbildung die Strahlen in die erforderlichen verschiedenen Raumrichtungen zum Prüfling hin gestreut werden, daß dieses Muster über den Prüfling in Reflexion oder durch den Prüfling hindurch in Transparenz beobachtet wird, daß das Muster und der Prüfling gleichzeitig optimal scharf abgebildet werden, daß das Muster vorzugsweise mehrfach verschoben beobachtet wird und die beobachteten Musterbilder gespeichert werden, und daß aus den Musterbildern die lokale Deformation des beobachteten Musters bestimmt wird,

und daß aus dieser Deformation die lokale Neigung oder Krümmung der vom Prüfling reflektierten oder transmittierten Strahlen oder die Form des Prüflings bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Sinusmuster durch Projektion von Schwarz-Weiß-Mustern mit Hilfe einer astigmatischen Optik erzeugt werden und die Deformation der beobachteten Musterbilder durch Bestimmung der lokalen Phase der Muster bestimmt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Muster nacheinander in zwei zueinander senkrechten Richtungen projiziert werden und die lokalen Neigungskomponenten nacheinander in den Richtungen senkrecht zur Streifenrichtung bestimmt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Muster der Form des Prüflings durch Vorverformung so angepaßt werden, daß das beobachtete Musterbild eine einfach auswertbare Gestalt hat.
5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die lokale Neigungsdifferenz gegen ein Referenzobjekt bestimmt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Referenzobjekt die Grundform des Prüflings annähert.
7. Verfahren nach Anspruch 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der Form des Prüflings durch Integration der lokalen Neigung bestimmt wird, und daß die lokale Krümmung des Prüflings durch Differentiation der lokalen Neigung bestimmt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Streuer bewegt wird, um eine Mittelung über kohärentes Rauschen zu erzielen.
9. Verfahren nach Anspruch 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß ein fluoreszierender Streuer verwendet wird, der durch die beleuchtende Strahlung zur Fluoreszenz angeregt wird, und die Fluoreszenz-Strahlung für die Bestimmung der lokalen Neigung verwendet wird.
10. Verfahren nach Anspruch 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Apertur der Musterprojektion größer oder mindestens gleich der die Beobachtungsapertur der Hilfsoptik gewählt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß störende Reflexe an Grenzflächen des Prüflings durch in-Kontakt-Bringen mit absorbierenden Materialien beseitigt werden.
12. Verfahren nach Anspruch 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Hilfsoptik auf den Prüfling fokussiert wird.
13. Verfahren nach Anspruch 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Apertur der Hilfsoptik so gering eingestellt wird, daß die durch Beugung erzeugte laterale Auflösung der geforderten Auflösung  $1/\delta x$  entspricht, und daß der Abstand  $d$  zwischen dem Muster und dem Prüfling so gewählt wird, daß er mindestens der Schärfentiefe  $d_{\min}$  der Abbildung durch den Prüfling entspricht.
14. Verfahren nach Anspruch 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Periode des Musters so gewählt wird, daß sie größer oder gleich ist wie die auflösbare Distanz  $\delta x$ , multipliziert mit dem Faktor  $d/d_{\min}$ , aber kleiner oder gleich ist dem Produkt aus dem tangens der aufzulösenden Winkeldistanz  $\tan \delta \omega$  und dem Abstand  $d$  und dem Qualitätsfaktor  $Q$ .
15. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet daß,



ein Projektor ein Muster mit vorzugsweise sinusförmig verlaufender Intensität auf eine Streuscheibe projiziert, diese Streuscheibe die Strahlen in alle erforderlichen Richtungen so auf den Prüfling lenkt, sodaß der Prüfling von der Hilfsoptik aus betrachtet, in seinen wesentlichen Teilen hell erscheint, das Muster nach Reflexion am Prüfling oder nach Durchgang durch den Prüfling mit der Hilfsoptik auf einem Empfänger abgebildet wird, das Muster und der Prüfling gleichzeitig optimal scharf abgebildet werden, das Muster vorzugsweise mehrfach verschoben abgebildet wird und im Speicher die Musterbilder gespeichert werden und aus den gespeicherten Musterbildern die lokale Deformation des Musters errechnet wird, und daß aus der Deformation des Musters die Form des Prüflings oder seine optischen Eigenschaften errechnet werden.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

Fig. 1 PRINZIP DER PHASENMESSENDEN  
DEFLEKTOMETRIE

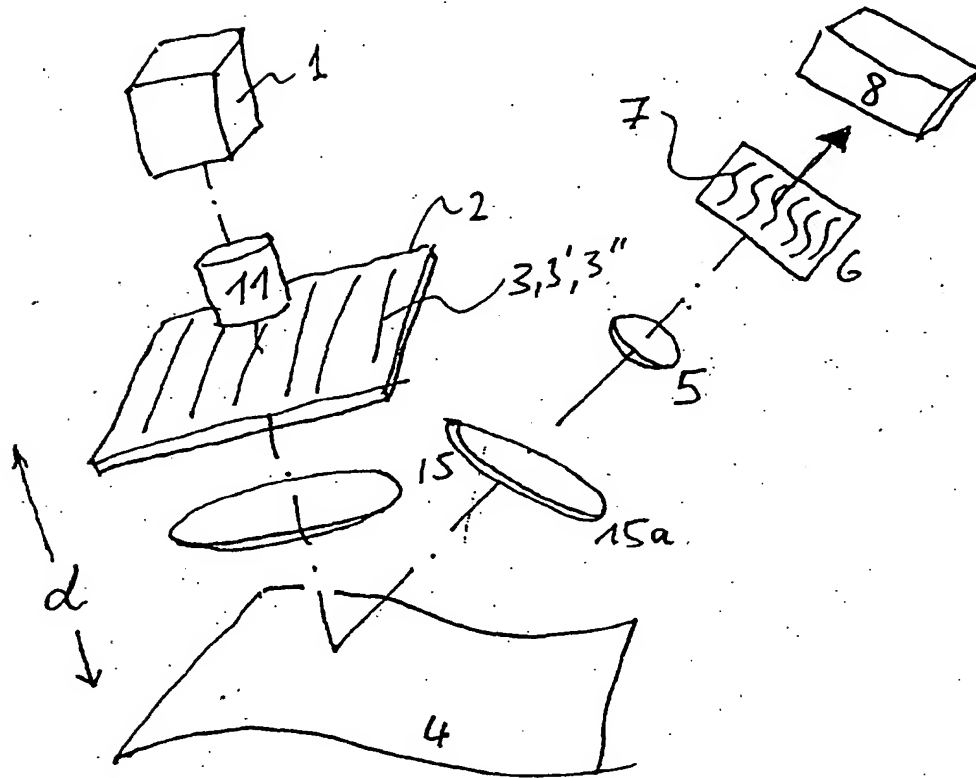


FIG. 2 GEOMETRISCHE BEZIEHUNGEN

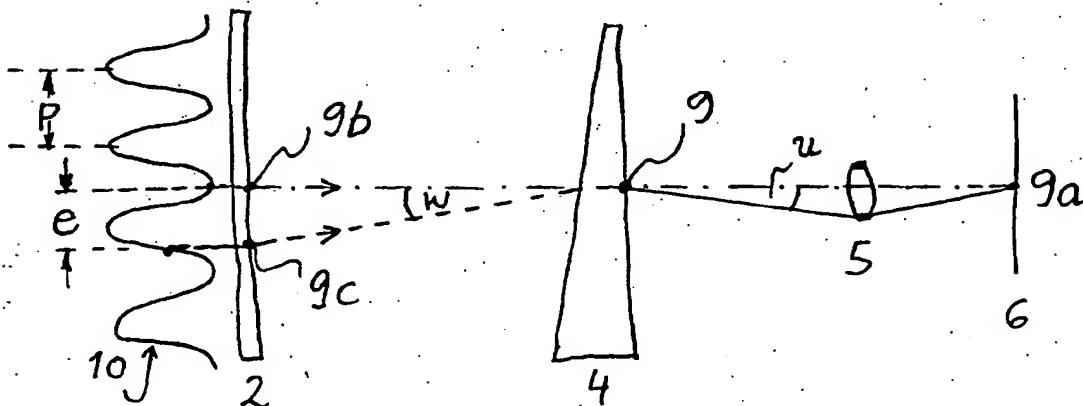


FIG. 3: ERZEUGUNG VON SINUSHAUSTERN

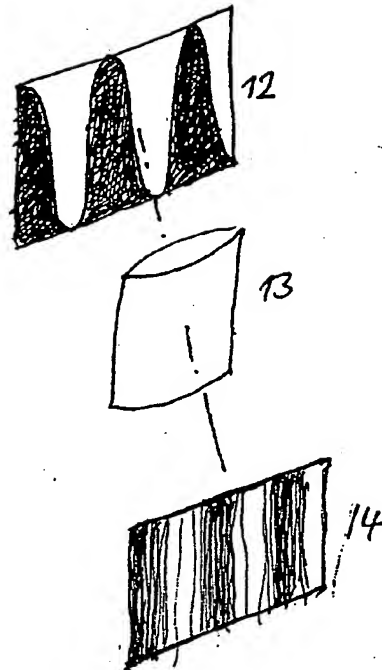


FIG. 4 STREUSCHEIBE

